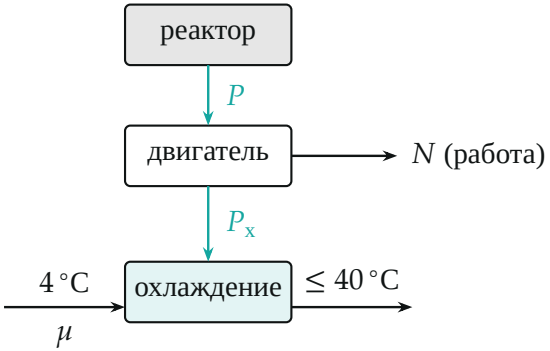
# Охлаждение двигателя подлодки

**Задача 5.** [Курчатов 2015/16, 8 класс, задача 5] Температура окружающей подводную лодку воды равна +4 °C. Ядерный реактор лодки непрерывно выделяет тепловую мощность 0,4 ГВт. Максимальный КПД теплового двигателя подлодки равен 0,4. Оцените величину минимального расхода охлаждающей двигатель забортной воды. На выходе из системы охлаждения вода не должна иметь температуру выше +40 °C.

Удельная теплоёмкость воды равна 4,2 кДж/(кг · °C). Расходом называется масса воды, проходящей за единицу времени через систему охлаждения; расход измеряется в кг/с.




*Поясняющий рисунок: тепло реактора $P$ двигатель частично превращает в работу $N$, остальное $P_x$ отдаёт охлаждающей воде; через систему охлаждения проходит забортная вода с расходом $\mu$.*

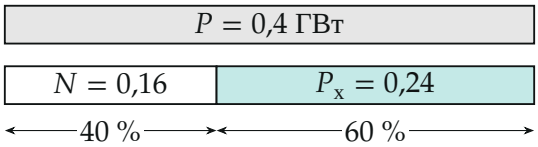
▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на тепловой двигатель и уравнение теплового баланса. Любой тепловой двигатель обязан отдавать часть полученного тепла холодильнику — здесь это забортная вода. Чем больше КПД, тем меньше тепла уходит в воду; минимальный расход соответствует максимальному КПД и наибольшему допустимому нагреву воды.

**Обозначения.** $P = 0{,}4$ ГВт — тепловая мощность реактора; $\eta = 0{,}4$ — КПД; $N$ — полезная мощность; $P_x$ — мощность, отдаваемая охлаждающей воде; $\mu$ — расход; $c = 4{,}2$ кДж/(кг · °C); $t_0 = 4$ °C, $t_1$ — температура воды на выходе, $t_1 \le 40$ °C.

**1. Тепло, отдаваемое холодильнику: закон сохранения энергии для двигателя.** За время $\Delta t$ двигатель получает от реактора $P\Delta t$, совершает работу $N\Delta t = \eta P\Delta t$, а остальное отдаёт воде (рисунок 2):

$$P_{\text{х}} = P - \eta P = (1 - \eta)P.$$

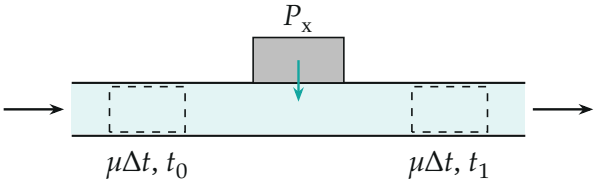
Значение: $P_{\text{х}} = 0{,}6 \cdot 0{,}4$ ГВт $= 0{,}24$ ГВт $= 2{,}4 \cdot 10^8$ Вт. При КПД меньше максимального воде достаётся ещё больше — поэтому для минимального расхода берём $\eta = 0{,}4$.




*Как делится мощность реактора (в гигаваттах): 40 % — в работу, 60 % — в забортную воду.*

**2. Нагрев воды: уравнение теплового баланса за время $\Delta t$.** За $\Delta t$ через систему проходит вода массой $\mu\Delta t$ и нагревается от $t_0$ до $t_1$ (рисунок 3). Всё тепло $P_{\text{х}}\Delta t$ идёт на этот нагрев:

$$P_{\text{х}}\Delta t = c\,\mu\Delta t\,(t_1 - t_0) \quad \Longrightarrow \quad \mu = \frac{(1 - \eta)P}{c\,(t_1 - t_0)}.$$

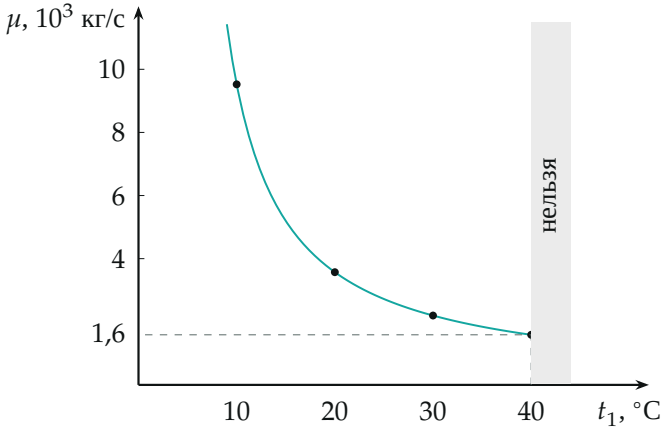



*Порция воды массой $\mu\Delta t$ входит холодной ($t_0$), забирает тепло $P_{\text{х}}\Delta t$ и выходит тёплой ($t_1$).*

**3. Наименьший расход.** Расход тем меньше, чем сильнее нагревается вода, а нагревать её можно не выше 40 °C. Значит, $t_1 = 40\,^\circ\text{C}$:

$$\mu_{\min} = \frac{2{,}4 \cdot 10^8 \text{ Вт}}{4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}} \cdot 36\,^\circ\text{C}} \approx 1{,}6 \cdot 10^3 \text{ кг/с}.$$

Как расход зависит от температуры на выходе — рисунок 4.




*Необходимый расход в зависимости от температуры воды на выходе: $\mu = \frac{(1-\eta)P}{c(t_1-t_0)}$; точки при 10, 20, 30, 40 °C — 9,5; 3,6; 2,2; 1,6 тысячи кг/с. Правее 40 °C — запрещено условием.*

**Обратите внимание.** В воду уходит не вся мощность реактора, а только $(1-\eta)P$: работа двигателя $N = \eta P$ идёт на движение лодки и в систему охлаждения не попадает. Ошибка «вся мощность реактора — в воду» дала бы $\mu \approx 2{,}6 \cdot 10^3$ кг/с.

**Ответ:**

$$\mu_{\min} = \frac{(1-\eta)P}{c\,(t_1 - t_0)} \approx 1{,}6 \cdot 10^3 \text{ кг/с}.$$

**Проверка.** Размерность: $\frac{\text{Вт}}{\text{Дж}/(\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C})\cdot{}^\circ\text{C}} = \frac{\text{кг}}{\text{с}}$. Предел: при $\eta \to 1$ расход стремится к нулю — идеальной машине холодильник не нужен; при $t_1 \to t_0$ расход неограниченно растёт. python: $\frac{2{,}4\cdot 10^8}{4200\cdot 36} = 1587$ кг/с — около полутора тонн воды в секунду.

**Ответ.** $\mu_{\min} = \dfrac{(1-\eta)P}{c\,(t_1 - t_0)} \approx 1{,}6 \cdot 10^3$ кг/с.